

IEKP-KA/2003-06

**WISSENSCHAFTLICHER
ZWISCHENBERICHT**

BMBF Fördervorhaben

TESLA Beamscope und Tracker

Januar 2002 - Dezember 2002

**Institut für Experimentelle Kernphysik
Universität Karlsruhe**

W. de Boer^a, V. Bartsch, J. Bol, A. Dierlamm, L. Jungermann, E. Grigoriev, F. Hauler, J. Kaminski, B. Ledermann, Th. Müller

^aProjektleiter

1 Übersichtsangaben

Zuwendungsempfänger:	Universität Karlsruhe Postfach 6980 76128 Karlsruhe
Projektleitung:	Prof. Dr. W. de Boer Institut für Experimentelle Kernphysik Universität Karlsruhe
Förderkennzeichen:	05 HS1VK1/3
Ausführende Stelle:	Institut für Experimentelle Kernphysik
Thema:	Elementarteilchenphysik TESLA Beamscope und Tracker
Förderperiode:	01.01.2002 bis 31.12.2002

2 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Das TESLA-Projekt[1] untersucht die Möglichkeit eines Elektron-Positron-Beschleunigers mit einer Energie bis 800 GeV.

Die Arbeitsgruppe für Hochenergiephysik des Instituts für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe hat traditionell eine langjährige Erfahrung bei e^+e^- Experimenten und hat sich sowohl am TESLA-Strahl-Monitoring als auch an der Entwicklung eines Spuren-Detektors für das TESLA-Experiment beteiligt.

Bisherige Resultate dieses Vorhabens sind unter “Wissenschaftliche Ergebnisse” ausführlich beschrieben worden. Hier folgt eine kurze Zusammenfassung:

- Untersuchungen an Monolithischen Aktiven Pixel Detektoren

CMOS Pixel Detektoren haben das Potential die teureren Vertex-Detektoren durch kostengünstige CMOS-Chips mit integrierter Elektronik zu ersetzen. Es wurde eine Methode gefunden um die Strahlungshärte dieser Sensoren um ein Vielfaches zu steigern. Hierfür wurde ein Patent eingereicht. Zusätzlich wurde die Effizienz der CMOS Sensoren in einem 4T Magnetfeld gemessen.

- Beamsopes.

Bei TESLA wird das Strahlprofil mit sogenannten Wirescannern gemessen. Hierbei wird ein dünner Kohlenstoffaden durch den Strahl gezogen und die Sekundärteilchen, die dabei entstehen und ausserhalb des Strahlrohrs als Funktion der Drahtposition nachgewiesen werden, geben Aufschluss über das Strahlprofil. Jedoch kann man mit dieser Methode nur den Mittelwert über viele Ladungspakete bestimmen. Wir haben erfolgreich erprobt, ob man diesen Kohlenstoffaden durch einen Diamantstreifendetektor ersetzen kann, womit dann für jedes Ladungspaket das Strahlprofil bestimmt wird. Die Herausforderung ist die enorme Strahlungs-dosis von 10^{14} Teilchen pro Ladungspaket pro cm^2 . Dies entspricht pro Ladungspaket einem Fluss, der einem Vertexdetektor erst nach 10 Jahren LHC erfährt. Wir fanden heraus, dass Aluminiumstreifen auf Diamant tatsächlich diese Strahlungsbelastung aushalten. Dies wurde als internationales Patent eingereicht.

- Lorentzwinkel Bestimmung.

Da der TESLA Detektor in einem hohen Magnetfeld betrieben wird, erfahren die driftenden Ladungsträger eine nicht vernachlässigbare Lorentzkraft. Der daraus resultierende Lorentzwinkel wurde sowohl für Elektronen als auch für Löcher in Magnetfeldern bis zu 9 T bestimmt. Da bei TESLA doppelseitige Sensoren geplant sind, sind die Kenntnisse über die sehr unterschiedlichen Lorentzwinkel für Elektronen und Löchern eine unabdingbare Voraussetzung für die Kalibrierung der Spurdetektoren. Die Temperaturabhängigkeit der gemessenen Hallstreu-faktoren für Elektronen stimmt nicht mit aus der Literatur bekannten Erwartungen überein.

- TPC-Entwicklung.

Im Conceptual Design Report[1] wurde als Hauptspurendetektor eine Time Projection Chamber (TPC) vorgeschlagen. Als Verstärkungselement der Gas-ionisation wurden GEM-Folien untersucht.

3 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

CMOS Pixeldetektoren: LEPSI, Straßburg; Univ. Como, Italien, ITE, Warschau, Univ. Krakau, Polen

Beamscope: GSI, Darmstadt; DESY;

Lorentzwinkelmessungen: FZ Karlsruhe;

TPC: CERN, DESY, LBL Berkeley, MPI München

4 Bisheriger Projektverlauf

Folgende Änderungen ergaben sich gegenüber dem Antrag:

- Die Untersuchungen auf dem Gebiet der CMOS Sensoren konnten erweitert werden durch die Genehmigung des EU-Projekts SUCIMA (Silicon Ultrafast Cameras for Gamma and Electron Detection in Medical Applications). Diese Kollaboration entstand November 2001, nachdem wir versucht hatten die DELPHI Pixeldetektoren für medizinische Anwendungen zu benutzen, insbesondere für die Vermessung des Strahlungsprofils der im Forschungszentrum Karlsruhe hergestellten radioaktiven Metallstützen (Stents) zur Vermeidung von Restenose bei Herzinfarktpatienten. Da die DELPHI Pixeldetektoren für den Nachweis einzelner Teilchen optimiert waren, waren sie zu langsam für die Auslese hochradioaktiver Präparate. Hierfür schienen die integrierenden digitalen Camera-chips viel besser geeignet, vor allem weil die Strassburger Gruppe schon gezeigt hat, dass diese Sensoren auch perfekte Teilchendetektoren sind.
Durch die EU-Unterstützung mit 3 Millionen Euro konnten viele Fragen grundsätzlicher nachgegangen werden, vor allem der Frage nach der Verbesserung der Strahlungshärte, wie bei den Ergebnissen berichtet wird.
- Als Beamscope wurde ursprünglich ein mit flüssigem Stickstoff gekühlter Siliziumstreifendetektor vorgeschlagen. Nach Diskussionen mit den Beschleunigerexperten wurde auf eine Stickstoffkühlung im Vakuum des Beschleunigers verzichtet, da das Risiko eines Lecks im Hochvakuumssystem zu hoch schien. Statt Silizium wurde dann ein Streifendetektor aus Diamant untersucht. Die vielversprechenden Resultate werden bei den Ergebnissen diskutiert.
- Zum Verständnis der Strahlungsschädigungen in Halbleiterdetektoren und der Lorentzwinkelmessungen wurde ein TCT¹ Setup gebaut. Hier wird der Drift einer mit einer Pikosekunden-Laser erzeugten Ladungswolke im Sensor gemessen. Dies erlaubt eine Bestimmung des Verlaufes des elektrischen Feldes im Halbleiter, woraus wichtige Daten, wie die Depletionsspannung, die Verzerrung des elektrischen Feldes durch Strahlungsschädigung und die Driftmobilität bestimmt werden können.

¹Transient Current Technique

Die bisherigen Resultate dieses Vorhabens werden in den folgenden Kapiteln kurz beschrieben.

5.1 CMOS Pixeldetektoren

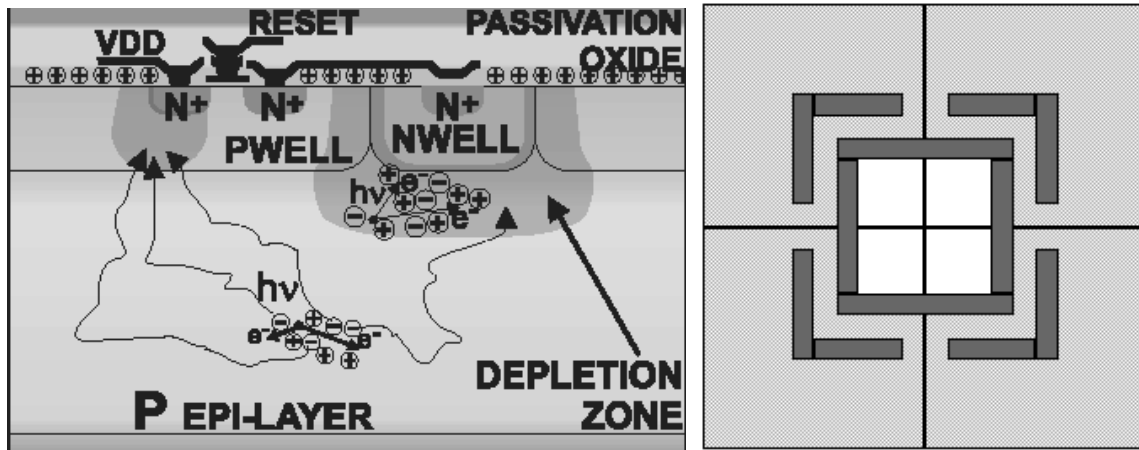


Abbildung 1: Links: Querschnitt eines CMOS-Pixels. Durch Bestrahlung entstehen positive Ladungen in der oberen Passivierungsoxidschicht. Hierdurch kann der p-leitende Potentialtopf für die Elektronik so stark depletiert werden, dass die Elektronen der Ionisation zur Betriebsspannung V_{DD} des Resettransistors gelangen können, statt zur N^+ Sammeldiode zu geraten.

Rechts: Bei dem patentierten Design für einen strahlungsharten Sensor wird die Elektronik (in der Mitte des Pixels) durch einen Guardring von den vier L-förmigen Sammeldioden getrennt.

Die Vorteile der aktiven Pixelsensoren sind u.a die Reduzierung der Kosten, weil das teure Bumpbonding zwischen Sensor und Auslese-Chip wegfällt. Zusätzlich beruht der Prozess auf Standard-CMOS-Technologie, wodurch die Bearbeitung der hochohmigen Siliziumsensoren durch Spezialfirmen entfällt. Die CMOS-Elektronik ist nur aktiv während der Auslese. Daher ist die Leistungsaufnahme sehr gering (ca. $5 \cdot 10^{-8}$ W/Pixel) und die Kühlung dementsprechend einfach. CMOS Pixeldetektoren haben ein breites Anwendungsgebiet, da sie sowohl sichtbares Licht, Gamma-Quanten und geladene Teilchen nachweisen können. Die Standard CMOS Technologie macht sie dementsprechend billig, so dass eine typische Web-Camera schon für 50 Euro zu haben ist. Wenn man die Linse abnimmt und eine radioaktive Quelle in die Nähe hält, sieht man auch bei diesen Billigcameras die emittierten Quanten als einzelne Hits auf dem Bildschirm. Das Problem ist jedoch die geringe Strahlungshärte dieser kommerziellen Sensoren: nach ca. 10 Minuten Bestrahlung mit einem typisch in einem Krankenhaus verwendeten Präparat von einigen Ci sind die typischen Sensoren tot.

Innerhalb der SUCIMA Kollaboration wurden Testsensoren entwickelt in der “deep-submicron” Technologie, wie sie für die Vorverstärker der CMS Kollaboration entwickelt wurden. Mit dieser Technologie kann man die Elektronik extrem strahlungshart machen, vor allem durch

die Einkapselung der MOSFETs mit Guardringen. Dann wurden gezielte Bestrahlungen dieser Testsensoren mit unterschiedlichen Teilchen (Gammas, Protonen, Neutronen) vorgenommen. Dabei stellte sich heraus, dass die Strahlungshärte sich kaum verbessert hat, insbesondere die Bestrahlung mit 10 bis 60 keV X-rays in unserer Röntgenstation ließ die Ladungssammlungseffizienz schon nach 10 kRad halbieren. Dies deutete auf Oberflächenschädigung der Oxidlagen hin, weil die Röntgenstrahlen nur an der Oberfläche absorbiert werden. Im Oxid werden Störstellen produziert, wobei die Elektronen genügend Mobilität haben, um zur positiven Versorgungsspannung zu gelangen. Übrig bleibt eine positive Restladung im Oxid, die Elektronen aus den Schichten unterhalb des Oxids anzieht. Hierdurch wurde ein Teil der in der Epitaxialschicht durch Ionisation entstandene Ladung durch den p-Well zur Reset-Transistor gezogen statt auf die n-Typ Sammeldiode zu gelangen. Dies ist in Abb. 1 nochmal dargestellt.

Die Lösung liegt darin, dass man die Elektronik räumlich und mit einem zusätzlichen p-gedopten Guardring von den Sammeldioden trennt, wie in Abb. 1 dargestellt. Diese Konfiguration wurde patentiert. Die Idee wurde bisher getestet mit Teststrukturen ohne Resettransistor, die erheblich strahlungsresistenter waren. Künftige strahlungsharte Strukturen werden im Laufe dieses Jahres erwartet.

5.2 Beamscope

Bei TESLA sollen Ladungspakete von 10^{10} Elektronen beziehungsweise Positronen beschleunigt und im Wechselwirkungspunkt stark fokussiert zur Kollision gebracht werden. Dafür sind sehr genaue Informationen über die Strahlposition und die Größe der Ladungspakete notwendig. Zur Messung des Strahlprofils können Streifendetektoren aus Halbleitermaterialien statt Wirescanner in den zu messenden Strahl gebracht werden. Streifendetektoren haben den Vorteil, dass einzelne Ladungspakete vermessen werden können statt, wie bei den Wirescannern, über viele Pakete zu mitteln. Beim Durchqueren des Materials verlieren die Teilchen in einem Ladungspaket Energie. Diese Energie wird zum Teil zur Anregung von Elektronen-Lochpaaren verwendet. Dadurch wird in die Elektroden ein Strom induziert, der der Anzahl der erzeugten Ladungsträger proportional ist. Durch die Streifen ist eine Ortsauflösung in einer Raumrichtung möglich. Werden mehrere Streifenstrukturen verwendet, beispielsweise auf Vorder- und Rückseite eines Detektors, ist auch eine Ortsauflösung in mehr als eine Raumrichtung möglich. Wird zur Auslese eine schnelle Elektronik verwendet, ist auch eine Aussage über die Größe eines Ladungspaketes in Längsrichtung möglich. Voraussetzung ist allerdings auch, dass die Länge des Ladungspaketes gegenüber der Dicke des Detektors groß ist. So können Halbleiterstreifendetektoren online Auskunft über Position und Größe der Ladungsträgerpakete geben.

5.2.1 Auswahl geeigneter Detektormaterialien

Der Strahl bei TESLA soll vor der Endfokussierung eine Querschnittsfläche von $3 \times 60 \mu\text{m}$ haben. Daher ergibt sich eine Strahlenbelastung im Bereich von 10^{16} Elektronen/cm² für ein Teilchenpaket. Geeignet für diese Belastung erschien zunächst kryogenes Silizium, das einer Strahlenbelastung von ungefähr 10^{15} Protonen/cm² standhalten kann. Da die Kühlung

von Silizium auf kryogene Temperaturen von etwa 77 K im UHV² von TESLA ein Risiko darstellt, fiel der Blick auf Diamant. Diamant hat auch ohne Kühlung eine ähnlich hohe oder höhere Strahlenhärte. Ein am Zyklotron in Karlsruhe mit mehr als 10^{16} Protonen/cm² bestrahlter Diamant konnte noch problemlos α -Strahlung nachweisen. Ein weiterer Punkt der sich für Diamant positiv bemerkbar macht, ist die hohe Wärmeleitfähigkeit, wodurch die lokale Wärmeentwicklung durch die Strahlverluste sich schnell verbreitet. Zusätzlich ist die Ladungsträgermobilität bei Diamant größer als bei Silizium. Zusammen mit den üblicherweise geringeren Dicken und höheren Spannungen (> 1 V/ μ m) ergeben sich im Diamant wesentlich kürzere Signale. Dies wirkt sich positiv auf die erreichbare longitudinale Auflösung der Ladungspakete aus.

5.2.2 Messungen

Die hohen Teilchenflüsse erzeugen plasma-ähnliche Verhältnisse in einem Sensor, so dass sich 2 Fragen stellen: a) Bleibt die Metallisierung auf dem Diamant intakt? b) Ist die Ladungssammlung noch linear? Am TTF³ wurde auf den mechanischen Arm eines Wiescanners ein Diamantdetektor installiert. Da dieser direkt im Hochvakuum der Maschine integriert ist, hat man leider nur etwa ein bis zwei Mal per Jahr Zugang zum Detektor, was das Experimentieren sehr schwierig macht. Daher wurde ausgewichen auf einen Plasmastrahl aus Schwerionen am GSI. Die Messungen wurden mit einem Strahl von Ladungspaketen von bis zu $3 \cdot 10^{10} O^{16+}$ -Ionen, der auf einen Durchmesser von 1 mm Durchmesser fokussiert war, durchgeführt. Durch die hohe Ladung pro Kern sind die Ionisationsverluste pro Ladungspaket noch erheblich größer als bei TESLA zu erwarten ist. Bisher wurde ein Diamant mit einer einfachen Elektrodenstruktur ohne Segmentierung verwendet. Da die Messungen mit Schwerionen bisher die größte Beanspruchung für den Detektor bedeutet haben, sollen diese Messungen hier exemplarisch dargelegt werden.

Zuerst wurde eine Aluminium Metallisierung ausprobiert. Wegen der geringen Dichte und der geringen Kernladungszahl sind die Energieverluste in diesem Metall gering. Auch die Haftung auf Diamant ist sehr gut. Tatsächlich stellte sich heraus, dass Aluminium Metallisierung die starke Ionisation eines Plasmastrahls problemlos aushält. Diese Entdeckung wurde zusammen mit der GSI patentiert.

Wie Bild 2 zeigt, sind die Pakete direkt mit einem Oszilloskop messbar; statt Verstärker benötigt man ein Dämpfungsglied. Bei noch höheren Teilchenzahlen sättigt der Detektor (Siehe rechte Seite der Abb. 2). Wie Simulationen mit SPICE ergeben haben, ist der induzierte Strom dann so groß, dass der Spannungsabfall über die mit 50 Ω abgeschlossene Koaxialkabel der Biasspannung des Detektors entspricht. Liegt beispielsweise am Detektor eine Spannung von 300 Volt an, fällt diese Spannung ab einem Strom von 6 Ampere voll am Eingangswiderstand des Auslesesystems ab, dass mit einem Koaxialkabel mit dem Detektor verbunden ist. Dies kann man umgehen, indem man das Auslesesystem niederohmig macht, z.B. dadurch dass direkt am Detektor ein Lastwiderstand von nur wenigen Ohm parallel zur 50 Ω der Kabelimpedanz geschaltet wird. Dies soll in zukünftigen Versuchen getestet werden.

²UHV: Ultra-Hoch-Vakuum

³TESLA Test Facility

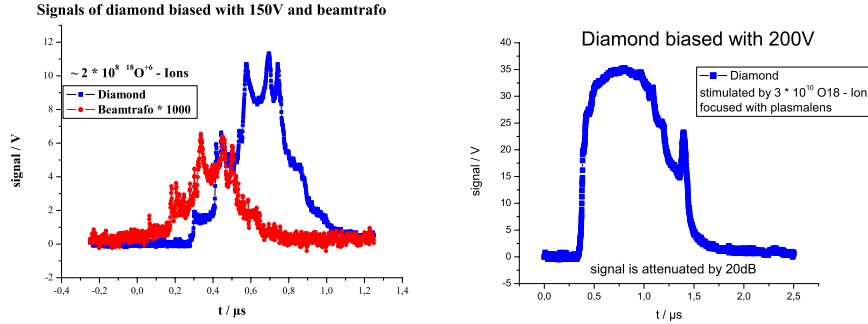


Abbildung 2: Signale eines Diamanten und einer Rettkowsky-Spule im Vergleich (links) und das Signal des gleichen Diamanten bei höherer Strahlintensität

Das Signal der Spule ist um den Faktor 1000 vergrößert dargestellt, damit sie etwa die gleiche Größe bekommt. Man sieht, dass der Diamant etwa die gleiche Pulsstruktur misst, wie die Spule. Das Signal des Diamanten wurde mit einem Dämpfungsglied mit 20dB abgeschwächt.

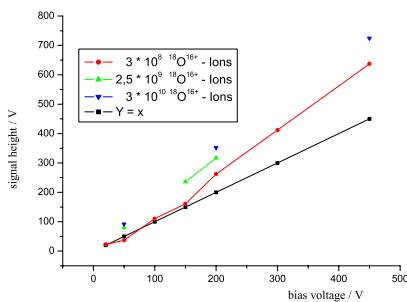


Abbildung 3: Signale eines Diamanten für verschiedene Strahlintensitäten über der angelegten Spannung aufgetragen
Die Daten wurden mit Schwerionen an der GSI aufgenommen.

5.2.3 Ausblick

Durch die hohen Teilchendichten in den beschleunigten Ladungspaketen entstehen im Detektor hohe Ladungsträgerkonzentrationen. Diese Konzentrationen entsprechen einem plasma-ähnlichen Zustand. Es stellt sich also die Frage ob in Streifendetektoren wie geplant ein Profil gemessen werden kann oder ob die Ladungswolke sich so schnell über den Detektor ausbreitet, dass das Signal mehrerer Streifen miteinander verschmiert. Weitere Messungen am Schwerionenbeschleuniger der GSI sollen dieser Frage nachgehen. Mit einem Streifendetektor mit verschiedenen Streifenbreiten soll untersucht werden, wie fein sich das Strahlprofil auflösen lässt.

5.3 TPC-Entwicklung

Aufgrund der großen Bandbreite der bei TESLA möglichen Physik werden bei dem Detektorbau besonders hohe Anforderungen an die Auflösung gestellt. Deshalb wurde als zentraler Spurdetektor eine Zeit-Projektions-Kammer gewählt, die unter anderem wegen der hohen Anzahl von Spurpunkten, der hohen Granularität und der geringen Materialdicke gut geeignet ist. Es wird eine Ortsauflösung von $150\mu m$ und eine Impulsauflösung von $\delta p_t/p_t^2 = 2 * 10^{-4}(GeV/c)^{-1}$ angestrebt [TESLA Technical Design Report, Part IV, ISBN 3-935702-03-5]. Um dieses anspruchsvolle Ziel auch im Dauerbetrieb zu erreichen, sollen zur Auslese der Kammer nicht Vieldrahtkammern verwendet werden, sondern Micro-Pattern-Gas-Detektoren. Diese bieten neben einer besseren Ortsauflösung auch den Vorteil, dass die bei der Gasverstärkung entstandenen Ionen schnell neutralisiert werden.

Es wurden von uns Gas-Electron-Multiplier (GEM)-Folien gewählt, um ihren Einsatz in einer Zeit-Projektions-Kammer zu testen. Sie bestehen aus einer $50\mu m$ dicken Kaptonfolie, die auf beiden Seiten mit Kupfer bedeckt ist. In diese Anordnung sind in einem Abstand von $140\mu m$ Löcher geätzt, die einen Innendurchmesser von $60\mu m$ aufweisen. Wird an beide Kupferseiten ein unterschiedliches elektrisches Potential angelegt, so entsteht in den Löchern ein hohes elektrisches Dipolfeld, das bei ausreichend hoher Potentialdifferenz zu einer Gasverstärkung in den Löchern führt. Bei geeigneter Wahl der elektrischen Felder ober- und unterhalb der GEM werden die Elektronen aus den Löchern extrahiert, während die Ionen auf dem Kupfer der GEM-Folie neutralisiert werden.

Um die GEMs in dieser Umgebung zu testen, haben wir zwei Driftzylinder angefertigt (s. Abb. 4, links). Beide weisen einen Innendurchmesser von 20 cm und einen maximalen Außendurchmesser von 26 cm auf. Sie bestehen aus einem doppelagigen Feldkäfig, der mit Kaptonfolie, GFK-Material und Honeycomb-Struktur verstärkt ist.

Außerdem wurde eine Kathode und ein Auslesebereich angefertigt. Der Auslesebereich beinhaltet die GEMs als Gasverstärkungsstufe, sowie eine Auslesestruktur, die die extrahierten Elektronen auf Pads sammelt und von der Elektronik ausgelesen wird. Dieser Auslesebereich ist sehr flexibel gehalten, so können beispielsweise die Anzahl der GEMs, die Abstände zwischen den GEMs usw. geändert werden. Aber auch andere Gasverstärkungsstufen wie z.B. Drähte oder Micro-Megas können problemlos eingebaut werden.

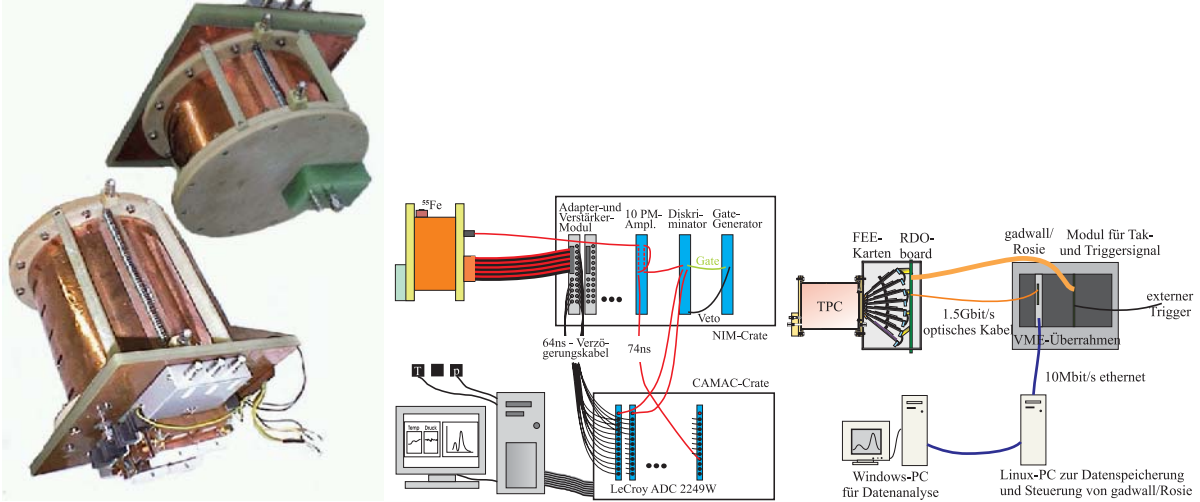


Abbildung 4: Kammern und Ausleseelektronik

Links sind die beiden Kammer zu sehen, in der Mitte die auf NIM und CAMAC basierende Ausleseelektronik und rechts Testaufbau für kosmische Myonen mit STAR-Elektronik.

5.3.1 Messungen und Ergebnisse

Zum Testen der Kammer wurde mit Hilfe von NIM- und CAMAC-Elektronik eine Auslese-kette zusammengestellt (s. Abb. 4, Mitte). Hierfür wurde eine vorhandene Vorverstärkerkarte angepasst und ein Hauptverstärkermodul entworfen und hergestellt. Die Digitalisierung geschah entweder mit CAMAC-ADCs oder CAMAC-TDCs.

Hiermit wurden die Eigenschaften der Kammer und der verwendeten Gase untersucht. So wurde bei Verwendung einer Fe^{55} -Quelle eine Energieauflösung von $\frac{\sigma_E}{E} \approx 9\%$ bestimmt. Desweiteren wurden die transversalen Diffusionskoeffizienten in $Ar : CH_4 90 : 10$ gemessen (s. Abb. 5, links). Für Driftgeschwindigkeitsmessungen stand eine Sr^{90} -Quelle zur Verfügung (s. Abb. 5, Mitte). Die Messungen zeigten eine starke Abhängigkeit der Gasverstärkung von der Temperatur. Diese konnte nach Einbau eines PT1000-Temperaturfühlers in die Kammer quantitativ zu $G \propto e^{31.6 \frac{mbar}{K}} \times \frac{p}{T}$ bestimmt werden. Analoge Messungen wurden mit anderen Gasgemischen durchgeführt.

Nachdem mit diesen Ergebnissen die Funktionstüchtigkeit der Kammer demonstriert worden war, wurde die für das STAR-Experiment am RHIC-Beschleuniger in Brookhaven entwickelte Elektronik in Betrieb genommen. Da die Elektronik für eine Drahtauslese konzipiert ist, musste der dynamische Bereich der FADC zunächst auf die negativen Signale einer GEM-Auslese angepasst und die Auslesesoftware auf unsere Anforderungen zugeschnitten werden. Hierdurch wurde die Auslesegeschwindigkeit um einen Faktor 20 beschleunigt und das Datenvolumen um den gleichen Faktor reduziert.

Für die Datenanalyse wurde ein vorläufiges Softwarepaket in Visual Basic entwickelt, das eine Visualisierung der Spuren, eine Pedestalsubtraktion, Signalinvertierung, Cluster-Suche, Cluster-Analyse, Spursuche und Spuranalyse beinhaltet.

Es wurde nun ein Teststand für kosmische Myonen konzipiert, der aus 2 Szintillatoren als Trigger, der Kammer und der STAR-Elektronik besteht. Hiermit soll die Effizienz und die Ortsauflösung in Abhängigkeit verschiedener Parameter gemessen werden. So werden

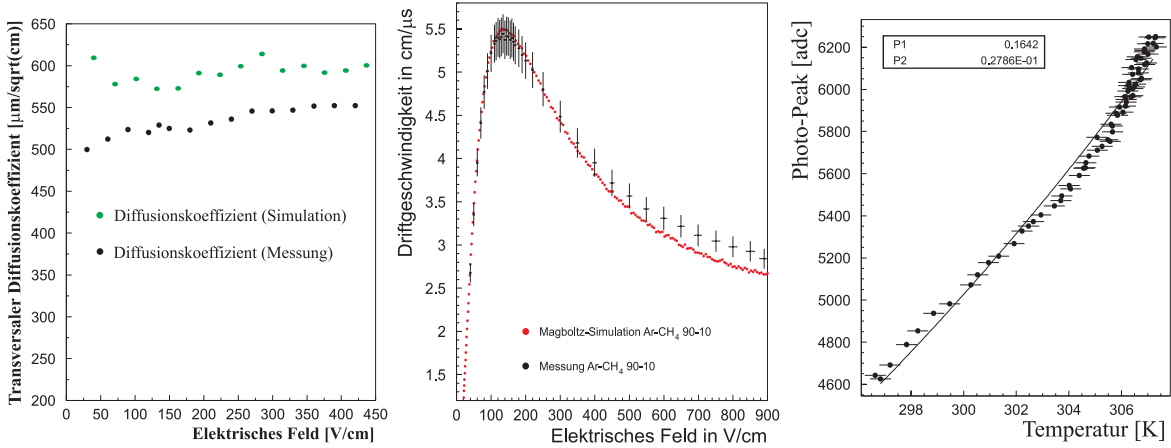


Abbildung 5: Test der Kammer

Links ist die transversale Diffusion in Abhängigkeit des elektrischen Feldes zu sehen, in der Mitte die Driftgeschwindigkeit in Abhängigkeit des elektrischen Feldes und rechts die Abhängigkeit der Gasverstärkung von der Temperatur.

zunächst die Spannungen variiert, um ihren Einfluss auf die oben genannten Messgrößen zu untersuchen. Dies ist noch im Gange, doch erste Ergebnisse für einige GEM-Spannungen zeigen folgende Resultate:

Summe der GEM-Spannungen = 710V (Verstärkungsfaktor = 2800) \Rightarrow Signal zu Rauschen = 15:1, Ortsauflösung 178 μm

Summe der GEM-Spannungen = 730V (Verstärkungsfaktor = 4500) \Rightarrow Signal zu Rauschen = 18:1, Ortsauflösung 124 μm (s. Abb. 6, Mitte und rechts)

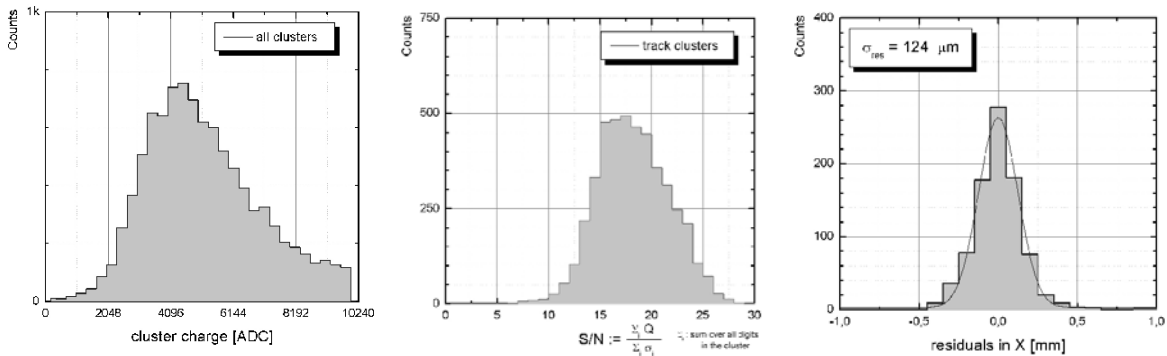


Abbildung 6: Ergebnisse mit STAR-Elektronik mit kosmischen Myonen

Links ist die Ladung einzelner Cluster in einer Spur zu sehen, in der Mitte das Signal zu Rauschverhältnis und rechts die Ortsauflösung in der transversalen Richtung.

5.3.2 Ausblick

Die Datennahme mit kosmischen Myonen soll bis in den Sommer fortgeführt werden. Anschließend soll die Vielspurauflösung der Kammer in einem π/μ -Strahl am PS-Beschleuniger

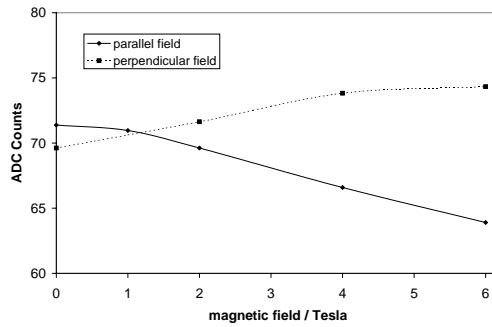


Abbildung 7: Die meist wahrscheinliche Pulshöhe als Funktion des Magnetfeldes parallel und senkrecht zur Oberfläche des CMOS-Sensors.

am CERN getestet werden. Außerdem sind noch einige Experimente in einem 5T-Magnetfeld am DESY in Hamburg geplant.

5.3.3 Zusammenarbeit

Die Arbeit an der Zeit-Projektions-Kammer erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Gaseous Detector Development Gruppe am CERN. Die Inbetriebnahme der STAR-Elektronik entstand in Kollaboration mit dem Lawrence Berkeley National Laboratory (Berkeley, USA) und dem Werner-Heisenberg-Institut des MPI in München.

5.4 Verhalten von Streifen- und Pixeldetektoren in einem starken Magnetfeld

Da die Spurendetektoren in einem 4T Magnetfeld betrieben werden müssen, ist die Frage nach dem Verhalten von sowohl Silizium-Streifendetektoren als auch CMOS-Pixel-Detektoren in hohen Magnetfeldern wichtig. Bei diesen unterschiedlichen Detektoren macht sich die Lorentzkraft ganz unterschiedlich bemerkbar durch die unterschiedliche effektive Dicke der Sensoren als auch durch die sehr unterschiedlichen elektrischen Feldstärken. Wir diskutieren zuerst die Messungen an CMOS Sensoren, dann die der Siliziumstreifendetektoren. Für diese Messungen stand uns ein 10 T Magnet im Magnetlabor des Forschungszentrums Karlsruhe zur Verfügung.

5.4.1 Ladungssammlungseffizienz der CMOS Sensoren in hohen Magnetfeldern

In einem CMOS Sensor werden die Ladungen nur innerhalb der Epitaxialschicht von einigen μm gesammelt. Daher ist die effektive Dicke des Detektors sehr gering und dementsprechend können auch die Ladungsverschiebungen durch die Lorentzkraft nur sehr gering sein. Zusätzlich beträgt die Depletionsspannung nur ca. 5 V oder weniger. Dadurch ist das elektrische Feld und damit die Mobilität der Ladungsträger gering. Die Elektronen driften nicht wirklich zur Elektrode, sondern gelangen durch Diffusion zufälligerweise in die Nähe der Sammelelektrode. Die Ladungssammlungszeit ist dementsprechend lang (ca. 100 ns)

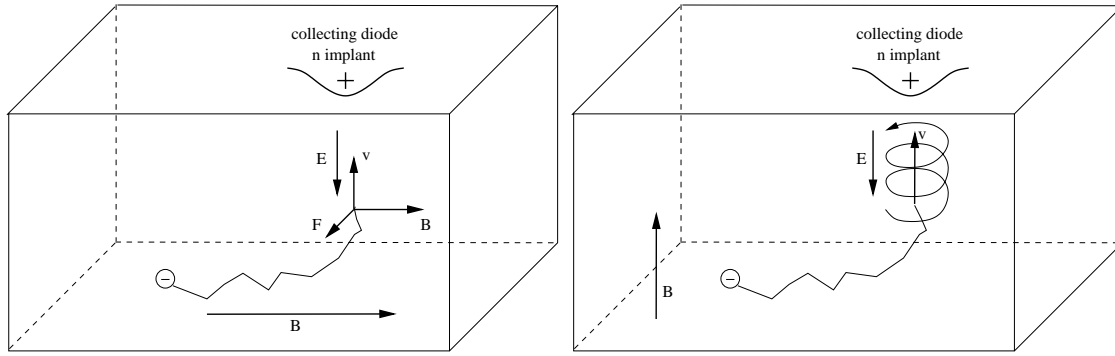


Abbildung 8: Links: Die Lorentz-Kraft übt eine Kraft senkrecht zur Sammeldiode aus. Rechts: Die Lorentz-Kraft fokussiert die Elektronen in Richtung der Sammeldiode.

und die Diffusion ist anisotrop durch die vorgegebene Richtung des Magnetfeldes, wie aus Fig. 8 ersichtlich ist. Dieses Bild entstammt unserer Publikation[2]. Es ist klar, dass die Ladungssammlungseffizienz für einen 4T Magnetfeld parallel (senkrecht) zum Sensor etwa 8% abnimmt (zunimmt). Qualitativ lässt sich dies durch einfache Überlegungen klar machen (siehe Fig. 7).

5.4.2 Lorentzwinkelmessungen an Siliziumstreifendetektoren

In einem Streifendetektor ist die Depletionsschicht typisch $300 \mu m$, so dass die Ladungsträger in einem starken Magnetfeld nicht mehr entlang den elektrischen Feldlinien, sondern unter dem Lorentzwinkel

$$\tan \theta = r_H \mu B$$

driften. Hier ist $\mu = v/E$ die Driftmobilität der Ladungsträger und der Winkel θ beträgt ca. 25 Grad für Elektronen und ca. 5 Grad für Löcher in einem 4 T Magnetfeld. r_H ist der Hallstreudefaktor. Wir haben in Karlsruhe eine ausgezeichnete Methode entwickelt, um den Lorentzversatz für Elektronen und Löcher getrennt zu messen[3]. Dabei wird der Lorentzversatz einer von einem Laser induzierten Punktladung als Funktion des Magnetfeldes gemessen, sowohl für die n- als auch für die p-Seite. Die Driftmobilität μ der Ladungsträger wurde unabhängig mit der TCT-Methode gemessen, so dass aus dem Lorentzwinkel bei einem gegebenen Magnetfeld nach der oben angegebenen Formel der Hallstreudefaktor bestimmt werden kann. Die TCT-Signale bei unterschiedlichen Biasspannungen, die das elektrische Feld im Sensor wiedergeben, sind in Abb. 9 gezeigt. Die Breite des Signals bestimmt die Driftzeit einer punktförmigen Ladungswolke, die an der Oberfläche mit einem kurzen Laserpuls erzeugt wird. Mit der vorgegeben Biasspannung kann daraus die Mobilität der Elektronen oder wenn man auf der anderen Seite einstrahlt, die Mobilität der Löcher berechnet werden. Der aus dem Lorentzwinkel und der Mobilität berechnete Hallstreudefaktor ist auf der rechten Seite der Abb. 9 gezeigt. Bei Zimmertemperatur stimmt r_H mit dem erwarteten Wert von 1.15 überein; bei tiefen Temperaturen soll der Wert auf $r_H = 1$ absinken[4] im Gegensatz zu den Messungen. Diese interessante Beobachtung ist bisher noch nicht verstanden.

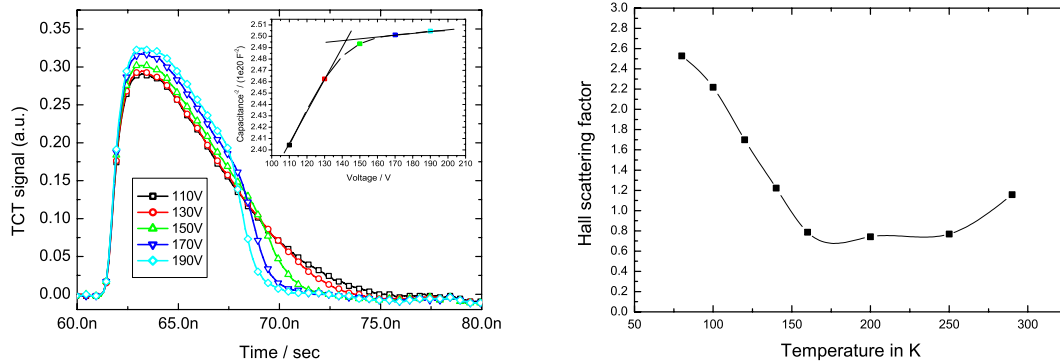


Abbildung 9: Links: TCT Signale als Funktion der Driftzeit. Beachte, dass das TCT Signal proportional zum elektrischen Feld im Sensor ist. Man sieht deutlich, dass auf beiden Seiten des Sensors ein elektrisches Feld ist, wenn die Biasspannung oberhalb 130 V liegt, d.h. die Depletionsspannung ist 130 V, wie auch aus der CV Kurve im Inset ersichtlich ist. Rechts: Der Hallstreufaktor als Funktion der Temperatur. Bei Zimmertemperatur stimmt r_H mit dem erwarteten Wert von 1.15 überein; bei tiefen Temperaturen soll der Wert auf $r_H = 1$ absinken[4] im Gegensatz zu den Messungen. Diese interessante Beobachtung ist bisher noch nicht verstanden.

6 Verwertung

Insgesamt entstanden aus diesem Vorhaben drei NIM Publikationen[2, 3], vier Diplomarbeiten⁴ und 6 Doktorarbeiten⁵ sind in Vorbereitung. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Doktoranden auch teilweise in andere Grosseperimente eingebunden sind, aber da beim Bau eines Grossgerätes nicht immer neue Forschungsgebiete erschlossen werden, bieten diese Entwicklungsarbeiten für einen Linear Collider eine sinnvolle Ergänzung zu unserem Forschungsprogramm. Wir begrüßen daher diese Förderung durch das BMBF sehr, weil in den Entwicklungen für die genehmigten Grossgeräten kein finanzieller Spielraum für Neuentwicklungen ist.

Aus den bisherigen Arbeiten in diesem Vorhaben wurden die “Neuigkeiten” als Patent angemeldet, wie es vom BMBF empfohlen wurde⁶

⁴J. Kaminski, Aufbau und Test einer Zeit-Projektions-Kammer mit GEM-Folien, IEKP-KA/2000-24;
B. Ledermann, Prototyp-Entwicklung einer Zeit-Projektions-Kammer mit GEM-Folien für den TESLA-Detektor, IEKP-KA/2002-12;
M. Koppenhfer, Measurements on CMOS pixel sensors for detection of ionising particles, IEKP-KA/2001-9;
S. Waldschmitt, TCT Messungen an Siliziumdetektoren, IEKP-KA/2003-3.

⁵A. Dierlamm, Doktorarbeit, Sommer 2003;
L. Jungermann, Doktorarbeit, Sommer 2004;
F. Hauler, Doktorarbeit, Sommer, 2004;
H. Bol, Doktorarbeit, Sommer 2004;
J. Kaminski, Doktorarbeit, Anfang 2004;
B. Ledermann, Doktorarbeit, Sommer 2006.

⁶Patent 1 innerhalb der SUCIMA Collaboration mit dem Titel: “Monolithic Active Pixel Dosimeter”. In diesem Patent wird eine Methode vorgeschlagen, um die CMOS Sensoren strahlungshart zu machen. Da CMOS-Sensoren nicht nur Licht, sondern auch Gammas und geladene Teilchen nachweisen können,

Literatur

- [1] ‘Conceptual Design Report of a 500 GeV e^+e^- Linear Collider with Integrated X-ray Laser Facility’, DESY 1997-048, ECFA 1997-182.
- [2] W. de Boer et al., Measurements with a CMOS Pixel sensor in magnetic fields, Nucl. Instr. Meth. **A 487** (2002) 163
- [3] V. Bartsch et al., Lorentz angle measurements in silicon detectors, Nucl. Instr. Meth. **A478** (2002) 330;
W. de Boer et al., Lorentz angle measurements in irradiated detectors between 77 K and 300 K, Nucl. Instr. Meth. **A461** (2001) 200.
- [4] F. J. Blatt, Physics of Electronic Conduction in Solids, McGraw-Hill, 1968.

gibt es ein breites Anwendungsfeld für strahlungsharte CMOS Sensoren, wie z.B. als Vertexdetektoren, Strahlmonitor, Dosimeter, digitale Röntgenaufnahmen usw.

Patent 2 wurde gemeinsam von der Universität Karlsruhe und der GSI Darmstadt angemeldet mit dem Titel: “Detektor zur Erfassung von Teilchenstrahlen”; in diesem Patent wird ein Diamant mit Streifen aus Aluminium als Beamscope vorgeschlagen. Wie bei den Ergebnissen erwähnt, haften Aluminium-Elektroden auch unter sehr intensiver Bestrahlung auf Diamant.